

# 単路部ボトルネックの 現象論的モデリングに関する議論

葛西 誠<sup>1</sup>

<sup>1</sup>正会員 秋田工業高等専門学校准教授 創造システム工学科土木・建築系 (〒011-8511 秋田県秋田市飯島文京町 1-1)

E-mail: kasai@akita-nct.ac.jp

減速波と増速波が対になって生起することが単路ボトルネック現象の本質と考えられることを、これまでの観測事実に基づいて述べる。

渋滞発生直後と渋滞発生後（定着時）は、渋滞先頭位置がゆらぐことが知られている。この性質は、サグ区間のみ交通流が不安定性を呈することによって説明されうると考える。この不安定性は、交通流もしくはその構成粒子の非線形性によって駆動されると考える。この非線形性により、協同現象の 1 つとしてボトルネック上の交通流現象が生じると考える。すなわち、ミクロ的な車両ふるまいとマクロ的な交通流としてのふるまいの間の齟齬が協同現象によって説明されるとする。このように考えたとき、渋滞対策としての交通流へのはたらきかけとして空間一様な加速促進が必ずしも効果的でない可能性を指摘する。

**Key Words:** bottleneck phenomena, basic segment times, traffic flow

## 1. はじめに

顕在化したボトルネックの容量を局所的に補強することは、「道路を賢く使う取組」<sup>1)</sup>の 1 つである。ボトルネックとなり得る地点のうち、サグやトンネル区間に生じる単路部ボトルネックが本稿で述べる対象である。

単路部ボトルネック容量と線形等要因との関係を統計モデルへあてはめることによって渋滞要因を検討した事例<sup>2)</sup>もあるものの、その後「ボトルネックとなり得るサグは大幅に増え」と指摘<sup>3)</sup>されており、「緩い縦断勾配変化が主たる原因」<sup>3)</sup>という理解が現状では合意の得られている有力な考えであろう。しかし、「縦断勾配が十分に緩ければそもそも渋滞のきっかけとなる速度変化は生じない」<sup>4)</sup>可能性があるし、ボトルネック容量と縦断勾配変化の関係は単純な線形関係ではなさそうである。

本稿でこの問題を解くことは著者の能力を大きく超える。議論のための視点のいくつかを提示することを狙いたい。

## 2. 単路部ボトルネック上での現象の再考

単路部ボトルネック現象として、われわれが観測することの何が本質であるのか、改めて考えてみたい。

### (1) 渋滞発生時

われわれが知っている現象としては以下のことがあげられよう。1) サグやトンネルが渋滞発生地点なり得ること<sup>5)</sup>、ただし 2) 全てのサグやトンネルが渋滞発生地点となるわけではないこと<sup>6)</sup>、3) 渋滞発生直前、あるいは発生時には、減速波が生じること<sup>6)</sup>、4) 発生時交通容量が確率的にふるまうこと<sup>3)</sup>、などである。

### (2) 渋滞定着時

定着現象は、渋滞先頭がある地点にとどまり続ける現象である。ただし必ずしも全てのサグが渋滞定着地点となるわけではない。

1) 渋滞発生後の捌け交通量が渋滞前交通容量よりも低い<sup>3)</sup>、2) 渋滞先頭はサグ内にとどまり続けること、ただし、3) 渋滞先頭地点はゆらぐ<sup>6)</sup>、4) 照度によって捌け交通量が変化すること<sup>5)</sup>、5) このため渋滞先頭地点が日没前後で移動する可能性があること<sup>7)</sup>、近年ではより空間分解能の高い ETC2.0 プローブデータによってより鮮明に当該現象がわかるようになっている<sup>8)</sup>。

### (3) 渋滞発生時と渋滞定着時との現象の類似性

渋滞先頭地点がサグあるいはトンネルにとどまり続ける現象の仮説は、すでに越<sup>9)</sup>によって指摘されている。減速波と増速波が対になって存在し、何らかの理由で渋

滞先頭がサグの上下流側に移動したとしても再び減速波と増速波（加速波）がサグ内に生じるため、継続して渋滞先頭がサグ内に閉じ込められる<sup>9)</sup>、とされている。

渋滞発生時も、いったん何らかの理由で減速波が生じた後は、定着と同様の現象が生じていると考えられる。すなわち、減速波と増速波が対になって間欠的に発生すること、結果として渋滞先頭がサグにとらわれ続けること、は渋滞発生時にも渋滞定着時にも共通の現象とみることができる。

#### (4) 補償の不足あるいは失敗

減速波と加速波のペアを生じさせる要因として根源的なものは、一般にはサグ内の縦断勾配変化と理解されている。ただし、この要因がどのようにして減速波と加速波のペアを生じさせるかの機構については、いくつかの考え方があり得る。1)上り勾配の影響で十分な加速ができない<sup>9)10)</sup>、すなわち補償不足に原因を求める考え方である。一方は、2)縦断勾配『変化』に対して適切な加速ができないとする、補償の失敗を原因とする考え方である。縦断勾配に対して適切な加速度が選定できずに高すぎる加速度となる場合をも含んでいる。

前者 1)の場合は、渋滞発生から十分な時間が経過して定常状態となっている状況では、空間的に均一に緩慢な加速がサグにとどまり続けることが予期される。減速波と加速波のペアが間欠的に生じる状況とはやや異なる。この減速波と加速波のペアが生じる機構としては、後者 2)の方が適切であるように思われる。そしてこれは、サグ内に不安定性の強い流れが生じていることを想像させる。

後者の立場を補強するもう一つの観点は、サグの下流側が必ずしも上り坂ではないにもかかわらず、ボトルネックとなっていた事例として東名(上)秦野サグの事例<sup>9)</sup>である。サグ下流側の上り勾配に対して十分な加速ができないとする前者の仮説では簡単には説明できない。

### 3. 施策への展開

このように考えると、渋滞対策としてより効果的な施策は、「減速波および加速波の対を生じさせるような、交通流の不安定性の解消」、あるいは「増速波発生によって、渋滞先頭をサグ上流に完全に追い出すこと」の 2 つが考えられるだろう。

#### (1) サグ上流へ流し去ること

古い事例ではあるが、LED 標識車をボトルネック上に配置したところ、渋滞先頭がサグ上流へ移動してしまい渋滞解消したと思われる例<sup>11)</sup>が報告されている。これ

は渋滞先頭での十分な増速波の発生を促していたものと考えられる。増速波を十分に発達させ、サグ上流に流し去ることが有効であると想像される。

ただし、増速波が生じると、ボトルネック上は一時的に自由流となるはずである。十分時間が経過すると再び減速波が生じる可能性がある。したがって、渋滞緩和を目指すならば、周期的に増速波を生み出さねばならない。

#### (2) 一様加速促進よりも周期的同期

時間的に一様に加速させることが、継続的に定着時の交通容量を向上させることとは異なるだろう。例えば、速度回復誘導灯<sup>12)</sup>の点灯パターンとして、一定速度で移流させるよりも周期的に（可能であれば速度に応じて）移流速度を変化させる方が効果的である可能性がある。

なお、渋滞発生時の減速波発生抑制は困難であっても、増速波が発達すれば渋滞の発生を遅らせられると考えられる。ただし、これはおそらく運転の個体差と関係していてモデル化も施策立案も難しいと思われる。

### 4. モデル化の方針

上記までの議論では、なぜ交通流の不安定性を生じるような区間がサグやトンネルに存在するのかが説明できてはいない。したがって、施策への展開として述べた内容は確かなモデル化によってより効果的になりうる。

第 2 章での議論によれば、交通流が一部区間のみで不安定性を呈するような仕掛けを考えればよい。その仕掛けとして考えられる候補は協同現象（集合現象とも呼ばれる）<sup>13)</sup>である。個々の粒子の挙動に非線形性があり<sup>14)</sup>、多数の粒子が集まったとき、ミクロ的なモデルの構造からは容易に想像できないマクロ的な挙動を示すのが協同現象の特徴である。そもそも交通流シミュレーションは、非線形なミクロ的車両挙動の集積としてどのような交通流現象が生じるかよくわからないために実行される側面を持っている。

このような協同現象として身近な題材は磁性体の相転移、超臨界流体のような相転移、ガラス転移があげられるであろう<sup>15)</sup>。サグ上での交通流現象がもし協同現象であるならば、渋滞対策の観点では、わずかなはたらきかけでもそれが遠くの車両まで増幅して伝播し、劇的に渋滞が解消する可能性を指摘できる。

物理学の世界ではミクロの世界は通常直接観測できない。交通流ではミクロの挙動が個体差や大きな偶然誤差や観測誤差を含んだものであったとしても曲りなりに観測できる。ミクロとマクロの間にある齟齬が間接的に推測できることは理学的にも十分興味深い対象であると考

える。

### 参考文献

- 1) 高速道路を中心とした「道路を賢く使う取組」の中間答申について：国土交通省 HP:  
[http://www.mlit.go.jp/policy/shingikai/road01\\_sg\\_000250.html](http://www.mlit.go.jp/policy/shingikai/road01_sg_000250.html)
- 2) 吉川良一, 長浜和実, Xing, J., 吉井稔雄, 北村隆一：高速道路暫定 2 車線区間におけるボトルネック交通容量に関する考察, 土木計画学研究・論文集, Vol.22, pp.839-845, 2005.
- 3) 大口敬, 中村英樹：日本における交通容量・サービスの質に関する研究の概観と展望, 土木学会論文集 D3, Vol. 67, No. 3, pp.217-229, 2011.
- 4) 大口敬：高速道路単路部渋滞発生解析—追従挙動モデルの整理と今後の展望—, 土木学会論文集, No.660/IV-49, pp.39-51, 2000.
- 5) 越正毅：高速道路のボトルネック容量, 土木学会論文集, No.371/IV-5, pp.1-7, 1986.
- 6) Xing, J., 越正毅：高速道路のサグにおける渋滞現象と車両追従挙動の研究, 土木学会論文集, No.506/IV-26, pp.45-55, 1995.
- 7) 米川英雄, 飯田克弘, 森康男：高速道路の渋滞中交通容量に影響を及ぼす要因の車線相違に関する研究, 交通工学, Vol.36, No.2, pp.53-63, 2001.
- 8) 立松和憲, 木村真也, 米川英雄：東名阪自動車道における渋滞遷移現象に関する考察, Vol.4, No.1, pp.B\_31-37, 2018.
- 9) Goni Ros, B., Knoop, V. L., Shiomi, Y., Takahashi, T., van Arem, B. and Hoogendoorn, S. P.: Modeling traffic at sags, *International Journal of Intelligent Transportation Systems Research*, Vol.14, pp.64-74, 2016.
- 10) Ozaki, H.: Reaction and Anticipation in the Car-following Behavior, *Proceedings of 12th International Symposium on Transportation and Traffic Theory*, pp. 349-366, 1993.
- 11) 野中康弘, 葛西誠, 石田貴志：都市間高速道路を対象とした車両挙動観測システムの開発と適用性, 第 24 回交通工学研究発表会論文報告集, pp.25-28, 2004.
- 12) 増本裕幸, 飛ヶ谷明人, 兒玉崇, 北澤俊彦, 鈴木健太郎, 友枝ゆかり, 李竜煥：阪神高速道路における速度回復誘導灯の効果検証と効率的な運用方法について, 交通工学論文集, Vol.4, No.3, pp.B\_1-B\_9, 2018.
- 13) 橋本昇, 豊田規人：2 値型集合に対する確率フィードバック模型, 物性研究, Vol.78, pp.588-602, 2002.
- 14) 西森秀稔：相転移・臨界現象の統計物理学, 培風館, 2005.
- 15) 宮崎州正：ガラス転移の統計物理学, 物性研究・電子版, Vol.4, No.4, 26pages, 2015.

(2018.4.27 受付)

## A DISCUSSION ON PHENOMENOLOGICALLY MODELING CAPACITY BOTTLENECK AT BASIC SEGMENTS

Makoto KASAI